

УДК 622.243:536.24

А.А. Кожевников¹ д-р. техн. наук; **А.Ю. Дреус**², канд. техн. наук;
С. В. Гошовский³, д-р. техн. наук; **И.И. Мартыненко**⁴, канд. техн. наук

¹ *Национальный горный университет, г. Днепрпетровск, Украина*

² *Днепрпетровский национальный университет, Украина*

³ *Украинский государственный геологоразведочный институт, г. Киев*

⁴ *Государственная геологическая служба, г. Киев, Украина*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИНЫ АЛМАЗНЫМИ КОРОНКАМИ

Введение. В соответствии с данными, приведенными [1], разрушение горных пород под термическим воздействием является одним из наиболее перспективных способов относительно снижения энергоемкости процесса. Следует отметить, что при вращательном бурении алмазными и твердосплавными коронками 70-95 % энергии, подводимой к породоразрушающему инструменту, расходуется на теплообразование. Эту энергию можно целенаправленно использовать для повышения эффективности процесса разрушения горных пород. Оптимизация тепловых процессов требует проведения соответствующих исследований в этом направлении, которые могут быть выполнены, в том числе с использованием расчетно-теоретического анализа.

Анализ работ по направлению исследований. Вопросы моделирования и расчета, тепловых полей в горной породе при ее разрушении с позиций разработки методов термического и термоциклического способов разрушения горных пород подробно рассмотрены [1–4]. В данных работах приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по разупрочнению горного массива за счет резко нестационарных тепловых нагрузок на границе. Такое воздействие осуществляется за счет использования специальных высокотемпературных или, наоборот, низкотемпературных газовых или жидких струй, которые предварительно воздействуют на горный массив и способствуют развитию в нем соответствующих термических напряжений. При этом время воздействия довольно велико по сравнению с периодом вращения инструмента. Такие исследования способствовали созданию и внедрению специальных термомеханических способов и инструментов разрушения горных пород.

Процессы теплопереноса на забое скважины при бурении алмазными буровыми коронками изучались в основном с позиции обеспечения ресурсосберегающих режимов бурения инструмента без учета термомеханических полей в горной породе, поскольку известно [1; 5], что высокие температуры могут негативно влиять на состояние породоразрушающего инструмента и способствуют его ускоренному износу. Математическое моделирование температурных полей в породоразрушающем инструменте выполнено, например, в [5–7]. Однако такие модели не позволяют исследовать тепловое состояние породы и соответственно обосновывать технологические параметры бурения алмазными коронками в целях создания оптимального температурного режима с позиции разрушения породы. Высокие температуры, генерируемые на забое скважины, могут приводить к термоупругому искажению профиля забоя, что в свою очередь, негативно влияет на эффективность процесса бурения [8]. Температурные поля в породе при бурении скважины алмазными коронками исследовались в стендовых условиях, [5]. Однако известные экспериментальные данные сложно экстраполировать на условия, отличные от условий конкретного исследования. В этом смысле создание и использование расчетной методики является более приемлемым подходом к изучению тепловых процессов для широкого диапазона определяющих параметров.

Постановка задачи. Алмазная коронка состоит из стального корпуса и матрицы, разделенной на сектора промывочными каналами. В процессе бурения в результате трения сек-

тора коронки по поверхности забоя скважины генерируется тепловой поток, который распределяется между горной породой и инструментом и нагревает приповерхностный слой породы до высоких температур [2]. Вслед за сектором над этим же участком забоя проходит промывочный канал, через который движется поток охлаждающего агента с температурой 20-40 °С. В результате в приповерхностном слое породы забоя возникают температурные колебания значительной амплитуды с частотой, равной произведению частоты вращения коронки на количество секторов в ней. Согласно экспериментальным данным [5], такие колебания наблюдаются в довольно тонком слое породы – менее 0,5 мм. Создаваемые при этом термоциклические напряжения приводят к термической усталости породы и могут способствовать появлению и развитию трещин и разрушению горной породы. Наилучшие условия для термоциклического разрушения породы создаются в том случае, когда после каждого цикла нагрев-охлаждение удается восстановить краевые условия. Восстановление краевых условий наиболее эффективно тогда, когда начальная температура на поверхности будет достигнута в момент окончания процесса охлаждения. Таким образом, динамика температурных полей в породе представляет интерес с позиции определения оптимальных тепловых режимов на забое скважины. Рассчитать температурные и механические поля можно методами математического моделирования.

Цель настоящей работы состоит в разработке математической модели и оценка теплового состояния призабойного слоя горной породы при бурении скважины.

Математическая модель и алгоритм расчета. При построении математической модели процесса забоя скважины будем рассматривать как твердое упругое полупространство со свойствами, не зависящими от температуры и равными средним значениям в диапазоне рассматриваемых температур от начальной до максимальной температуры нагрева [1]. В силу малости коэффициента теплопроводности горных пород исследуемая область ограничится тонким слоем призабойного участка породы. В этой связи в первом приближении можно ограничиться одномерной моделью, в которой температура будет изменяться только по глубине (ось x на рис. 1). Начало системы координат свяжем с поверхностью забоя.

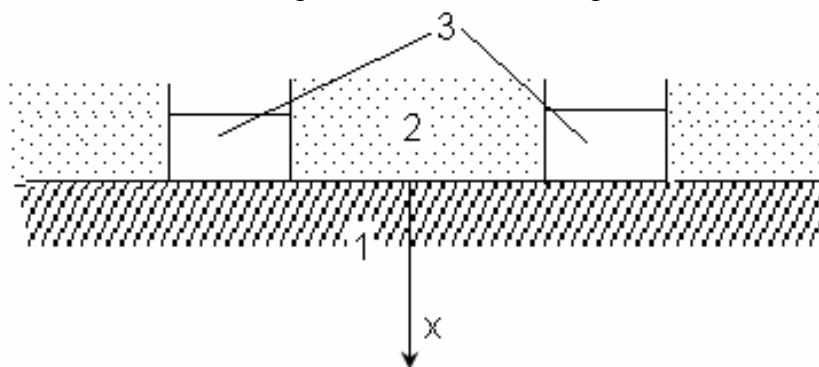


Рис. 1. Схема к расчету: 1 – горная порода, 2 – сектор матрицы, 3 – промывочные окна.

Задача теплопереноса представляет собой задачу нестационарной теплопроводности для полуограниченного тела при переменных во времени граничных условиях. Таким образом, условия на поверхности забоя носят циклический характер, когда фаза нагрева, за счет генерирования теплоты трения меняется на фазу охлаждения за счет теплообмена с промывочной жидкостью. Распределение температуры по глубине породы будет описываться уравнением теплопроводности

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right), \quad \tau > 0, \quad 0 \leq x \leq \infty, \quad (1)$$

где ρ – плотность породы, c – удельная теплоемкость, λ – коэффициент теплопроводности горной породы.

Начальное распределение температуры принимаем однородным по глубине

$$t|_{\tau=0} = t_0. \quad (2)$$

В строгой постановке для фазы нагрева $\Delta\tau_1$, т. е. при движении над рассматриваемым участком породы сектора матрицы коронки, необходимо решать совместную задачу теплопереноса в инструменте и горной породе с граничными условиями четвертого рода на контакте. В [9] показано, что в случае контакта породоразрушающего инструмента, который является хорошим проводником тепла, и горной породы, коэффициент теплопроводности которой во много раз меньше, рассматриваемую задачу можно разделить и использовать для расчета температуры в горной породе граничные условия первого рода. В соответствии с результатами [9] будем считать, что в период нагрева температура поверхности забоя достигает температуры инструмента для стационарного режима. Задача по определению этой температуры с учетом конструктивной реализации инструмента и режимов бурения была решена в [5], где было получено соответствующее соотношение для установившегося режима, которое имеет вид

$$t_a = t_{ж} + k_p N \left(\frac{l_1}{\lambda_a F_1} - \frac{1}{\lambda_m F_2 M_2} \cdot \frac{e^{M_2 l_1} - \Xi e^{-M_2 l_1}}{e^{M_2 l_1} + \Xi e^{-M_2 l_1}} \right)$$

где, $t_{ж}$ – температура промывочной жидкости; k_p – коэффициент распределения теплового потока между коронкой и породой; N – мощность, затрачиваемая на забое; $l_1=l_a$; l_a – выступание алмазов из матрицы; $l_2=l_1+l_{m1}$; l_{m1} – высота промывочного окна; λ_a, λ_m – коэффициенты теплопроводности алмазов и матрицы соответственно; F_1 – суммарная площадь контакта алмазов с забоем скважины; F_{m1}, F_{m2} – площадь сечения матрицы за вычетом площади соответственно торцевых и боковых промывочных каналов; $M_{m1} = \sqrt{\frac{\alpha_1 \Pi_1}{\lambda_m F_{m1}}}$; $M_{m2} = \sqrt{\frac{\alpha_2 \Pi_2}{\lambda_m F_{m2}}}$, M^{-1} ; α_1, α_2 – коэффициент теплоотдачи в промывочных каналах соответственно торцевых и боковых, Π_1, Π_2 – суммарный периметр промывочных каналов соответственно торцевых и боковых на внутренней и наружной поверхностях матрицы, $\Xi = e^{2M_2 l_2} \frac{\lambda_m F_3 M_3 - \lambda_m F_2 M_2}{\lambda_m F_3 M_3 + \lambda_m F_2 M_2}$.

Тогда для периода нагрева граничное условие для уравнения (2) записывает в виде

$$t|_{x=0} = t_a, \quad \tau \in \Delta\tau_1. \quad (3)$$

Постановка такого граничного условия является определенным упрощением, поскольку температура на контакте породы и сектора матрицы постоянна в течение периода $\Delta\tau_1$. Эта температура будет изменяться от минимальной до t_a . Однако поскольку в данном случае важна амплитуда температуры, а не характер ее изменения в течение периода $\Delta\tau_1$, а также с учетом результатов, приведенных в [9], такое допущение вполне оправданно. При прохождении промывочного окна осуществляется конвективный теплообмен между нагретой породой и промывочной жидкостью. Для периода охлаждения $\Delta\tau_2$ граничное условие имеет вид

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha (t|_{x=0} - t), \quad \tau \in \Delta\tau_2,$$

где α – коэффициент конвективного теплообмена.

Этот коэффициент можно определить из эмпирической формулы, полученной для случая течения вдоль плоской поверхности [10]

$$Nu = 0,76 Re^{0,5} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,25},$$

где $Nu = \frac{\alpha l_o}{\lambda_{ж}}$, $Re = \frac{w \cdot l_o}{\nu_{ж}}$, $Pr = \frac{\nu_{ж}}{a_{ж}}$, l_o – ширина промывочного окна, w – скорость потока промывочной жидкости, $\lambda_{ж}$, $a_{ж}$, $\nu_{ж}$ – коэффициент соответственно теплопроводности, температуропроводности и кинематической вязкости жидкости.

При этом скорость потока промывочной жидкости определяется по формуле

$$w = \sqrt{v^2 + u^2},$$

где v – линейная скорость потока при течении в промывочном канале; D – средний диаметр коронки, n – количество оборотов, $u = \pi \cdot D \cdot n$ – окружная скорость потока за счет вращения инструмента

Интервал времени соответственно нагрева и охлаждения

$$\Delta\tau_1 = \frac{l_s}{u}; \quad \Delta\tau_2 = \frac{l_0}{u},$$

где l_s – длина сектора коронки.

Результаты исследований. В соответствии с принятой математической моделью были выполнены расчеты температурного поля в горной породе при бурении алмазной коронкой диаметром 76 мм с шестью промывочными окнами при ширине промывочного окна 8 мм и длине сектора 27,34 мм. Расчеты выполнены для следующих исходных параметров:

коэффициент температуропроводности гранита $a = \frac{\lambda}{\rho c} = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, температура промывочной жидкости $t_{жс} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, температура на контакте $t_a = 350 \text{ }^\circ\text{C}$, количество оборотов коронки $n = 470 \text{ мин}^{-1}$.

Результаты моделирования температуры на поверхности забоя при выходе на установившейся тепловой режим показаны на рис. 2. Наблюдаются колебания температуры с частотой, равной произведению количества оборотов инструмента на количество секторов коронки. При этом амплитуда колебания температуры достигает $220 \text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты расчета температуры призабойной зоны по глубине показаны на рис.3. Как видим, колебания температуры происходят лишь в тонком слое породы (менее 0,5 мм) прилегающей непосредственно к забюю. Именно в этой области и следует ожидать максимального термоциклического воздействия.

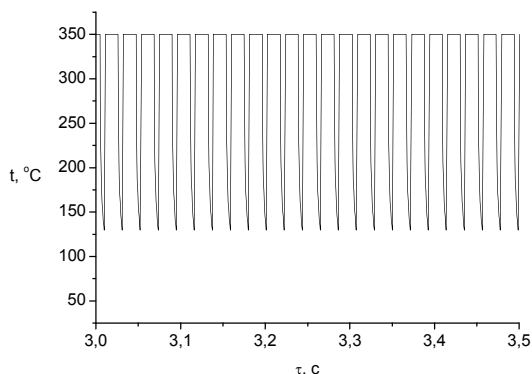


Рис 2. Температура поверхности забоя

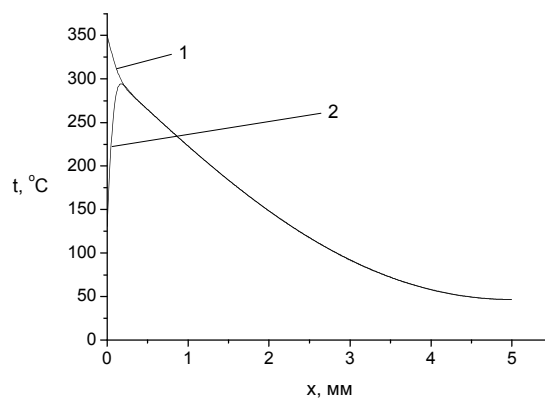


Рис 3. Распределение температуры в массиве горной породы: 1 – на момент окончания фазы нагрева, 2 – на момент окончания фазы охлаждения

Изменение температуры в некоторой точке породы по мере приближения к поверхности забоя (продвижения коронки при бурении) показано на рис.4. Видно как температура повышается и на расстоянии до поверхности забоя менее 0,5 мм наблюдаются колебания температуры с возрастающей амплитудой. Эта картина качественно соответствует экспериментальным осциллограммам, полученным при измерении температуры в блоке горной породы с помощью термопар [5].

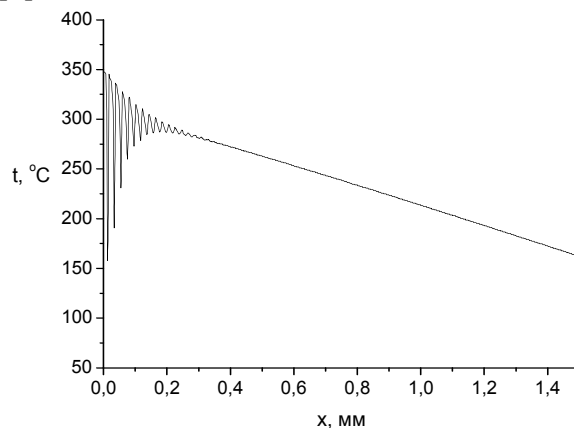


Рис.4. Колебания температуры в призабойном слое породы

Выводы. Приведенной математической моделью можно выполнять оценивать термонапряженное состояние в призабойной зоне горной породы при бурении алмазными коронками. Результаты исследований могут быть использованы для определения оптимальных, с позиции теплового воздействия на породу конструкционных и режимных параметров бурения.

Литература

1. Разрушение горных пород при термоциклическом воздействии / А.Н. Москалев, Е.Ю. Пигида, Л.Г. Керекелица и др. – К.: Наукова думка, 1987. – 248 с.
2. Разрушение горных пород при колонковом бурении геологоразведочных скважин / А.А.Кожевников, С.В. Гошовский, И.И. Мартыненко и др. – К.:Изд-во УкрГГРИ, 2006.– 146 с.
3. А.А. Галяс, С.А. Полуянский Основы термомеханического разрушения горных пород.– К.: Наук. думка, 1972.– 290 с.
4. А.П. Гончаров, С.А. Дмитриев Термическое и комбинированное разрушение горных пород. М.: Недра, 1978. – 304 с.
5. Забойные факторы алмазного бурения геологоразведочных скважин / Кожевников А.А., Гошовский С.В., Мартыненко И.И. и др. Днепрпетровск: ЧП «Ли́ра ЛТД», 2006. – 264 с.
6. Тепловое поле алмазной коронки при бурении с нестационарным режимом промывки скважины / А.А. Кожевников, С.В. Гошовский, А.Ю. Дреус и др. // Доповіді Національної академії наук України, №2. – 2007. – С. 62–67.
7. Вибір теплових режимів роботи твердосплавних елементів бурових коронок в умовах обмеженого охолодження на основі комп'ютерного моделювання / В.А. Дутка, В.М. Колодніцький, В.А. Лукаш та ін. // «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения», Сб. науч. тр. ИСМ НАН Украины. – вип.7. 2004. – С. 25 – 29.
8. О термоупругом искажении профиля поверхности забоя скажины при алмазном бурении / Кожевников А.А., Вахалин Ю.Н., Вырвинский П.П. и др. // «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения», Сб. науч. тр. ИСМ НАН Украины. – вип.8, 2005. – С. 18 – 22.

9. Дреус А.Ю., Кожевников А.А., Чайка А.И. О моделировании процессов теплопереноса на забое при бурении скважины // Промышленная теплотехника, Т. –29. – №3. – 2007. – С.29 – 35.
10. Лыков А.В. Тепломассообмен. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

Поступила 04.06.08